

マイクロ波能動素子の電子アドミタンスの振幅依存性の簡易測定法

林 健一* 井田良雄* 杉山和弘**

A Simple Technique Determining the Amplitude Dependence of Electronic Admittance of Microwave Active Devices

by

Ken-ichi HAYASHI, Yoshio IDA and Kazuhiro SUGIYAMA

Abstract

In this paper a simple technique determining the amplitude dependence of electronic admittance of microwave active devices is presented. The principle of the technique utilizing a frequency swept injection-locked oscillator is analyzed by using a simplified model of the microwave oscillator. In this method the determination of relative values of only four output powers is required. Reasonable results of the amplitude dependence are experimentally obtained for a Klystron and IMPATT and Gunn diodes.

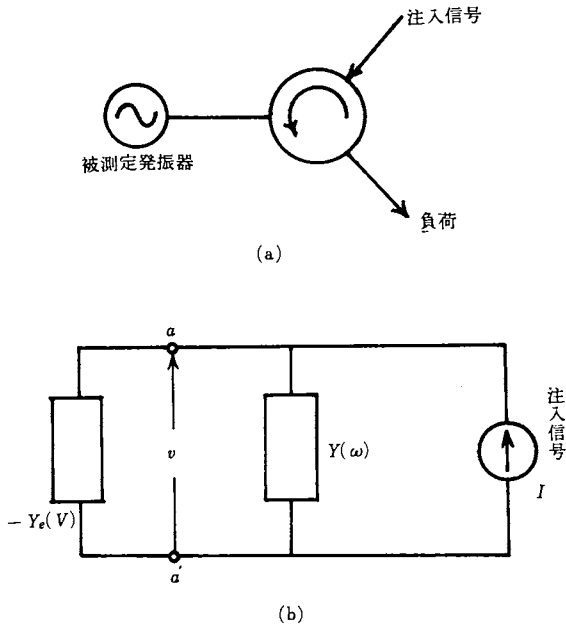
1. ま え が き

最近、インパットダイオードやガンダイオードなどのマイクロ波固体能動素子が反射形クライストロンにかわって、局部発振器や注入同期増幅器などとして、通信用に用いられるようになった。これらのマイクロ波能動素子の動作解析にはしばしばその電子アドミタンスの詳細な資料（発振振幅および周波数に対する依存性）を必要とする。しかし、その測定は決して容易とはいえず、これらの資料の製造業者による提供は期待できないのが現状である。そこでひとつの便法として素子の動作点の近傍における電子アドミタンスの発振振幅に対する依存性が簡易な測定により求められれば、上記の発振器や注入同期増幅器などの動作解析および設計にきわめて有用と考えられる。本論文ではその簡易測定法について述べる。

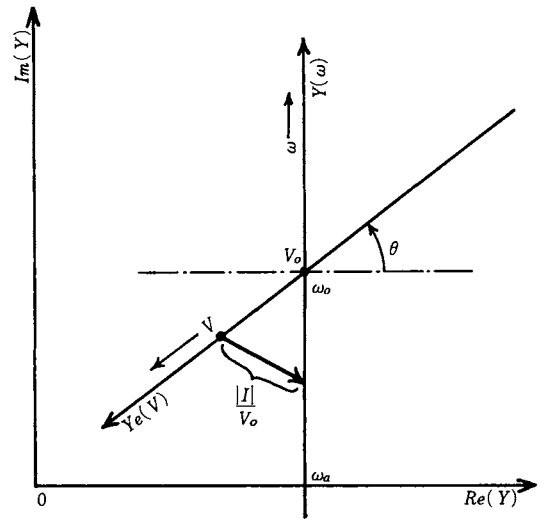
2. 測定法の原理

被測定発振器は第1図(a)に示すようにサーキュレータを通して周波数掃引発振器により一定電力で注入される。同図(b)はその等価回路を示す。図では素子端子 aa' を基準面にとり、 $-Y_e$ は素子の能

* 電子工学科 **電々公社 横須賀通研



第1図 (a)解析モデル, (b)等価回路

第2図 アドミタンス平面における電子アドミタンス $Y_e(V)$, 回路アドミタンス $Y(\omega)$ および注入ベクトル $|I|/V_0$ との関係

動電子アドミタンスを, Y は回路アドミタンス (共振回路および負荷を含む) を, また電流源 I は注入源を表わす。電子アドミタンス $-Y_e$ は一般に発振電圧振幅 V および角周波数 ω の関数であるが, 動作点の近傍にのみ着目すればその角周波数依存性は小さいので近似的に V のみの関数 $-Y_e(V)$ と考えてよい。また, 共振回路が単一同調回路からなるものとすれば,

$$Y(\omega) = G_a + G_L + j(\omega C - 1/\omega L) \\ \simeq G_a + G_L + j2C(\omega - \omega_a) \quad (1)$$

ここで, G_a は共振回路の損失コンダクタンス, G_L は負荷コンダクタンス, また $\omega_a (= 1/\sqrt{LC})$ は共振角周波数である。

発振器に対し注入源よりサーキューレータを通して角周波数 ω で電流振幅 I なる注入がなされるとする。第2図の矢印はこのときの注入ベクトルを表わし, その矢先は同期角周波数を, その尾は発振電圧振幅を与える。注入電流 I が小さい場合に同期範囲内では, その自励動作点 (V_0, ω_0) の近傍で $Y_e(V)$ を直線近似しうるものとすれば,

$$Y_e(V) = Y(\omega_0) - a(V - V_0)e^{j\theta} \quad (2)$$

ここで, θ は動作点において電子アドミタンス $Y_e(V)$ が実軸となす角を表わし, a は正の定数である。このとき第2図より同期条件として次式が成り立つ。

$$|Y(\omega) - Y_e(V)| = |I|/V_0 \quad (3)$$

式 (1), (2) を式 (3) に代入して $V - V_0$ について解けば,

$$V - V_0 = \frac{1}{a} [-C(\omega - \omega_0)\sin\theta + \sqrt{\frac{|I|^2}{V_0^2} - 4C^2(\omega - \omega_0)^2\cos^2\theta}] \quad (4)$$

上式で根号の前の符号は系の安定性を考慮して+符号のみを採用した¹⁾。式 (1), (2) および (4) から注

入同期時の出力電力 $P(V)$ は

$$P(V) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ Y(V) \} V^2 \\ \simeq P_0 \left[1 + \frac{G_a}{G_L} - \{ 2C(\omega - \omega_0) \sin \theta + \sqrt{\frac{|I|^2}{V^2} - 4C^2(\omega - \omega_0)^2 \cos^2 \theta} \} \right. \\ \left. \times \left(\frac{2}{aV_0} - \frac{\cos \theta}{G_L} \right) \right] \quad (5)$$

ここで、 $P_0 (= G_L V_0^2 / 2)$ は自励発振時の出力電力である。同期の限界角周波数 $(\omega - \omega_0 = \pm B_0 = \pm |I| / 2CV_0 \cos \theta)$ における同期時出力を $P(V)_{\pm}$ とすれば、

$$P(V)_{\pm} = P_0 \left[1 + \frac{G_a}{G_L} \pm 2CB \sin \theta \left(\frac{\cos \theta}{G_L} - \frac{2}{aV_0} \right) \right] \quad (6)$$

ここで、複号はそれぞれ同期の上限および下限の場合を表わす。また、自励発振角周波数と同一角周波数における同期出力を $P(V)_{\omega_0}$ とすれば、

$$P(V)_{\omega_0} = P_0 \left[1 + \frac{G_a}{G_L} - \frac{|I|}{V_0} \left(\frac{\cos \theta}{G_L} - \frac{2}{aV_0} \right) \right] \quad (7)$$

式 (6), (7) より $(\cos \theta / G_L - 2 / aV_0)$ を消去して次式を得る。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{[P(V)_+ - P(V)_-] / 2}{[1 + G_a / G_L] P_0 - P(V)_{\omega_0}} \quad (8)$$

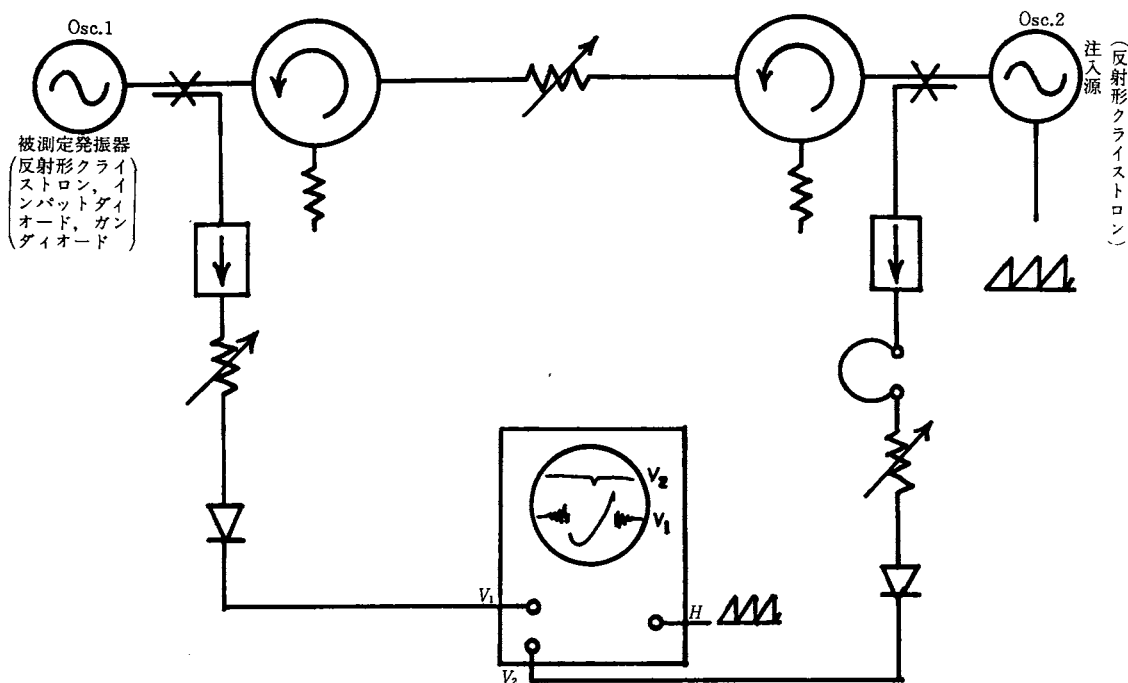
一般にマイクロ波発振器では $G_a \ll G_L$ がなりたつので式 (8) は次のように簡単化できる。

$$\theta \simeq \tan^{-1} \frac{[P(V)_+ - P(V)_-] / 2}{P_0 - P(V)_{\omega_0}} \quad (9)$$

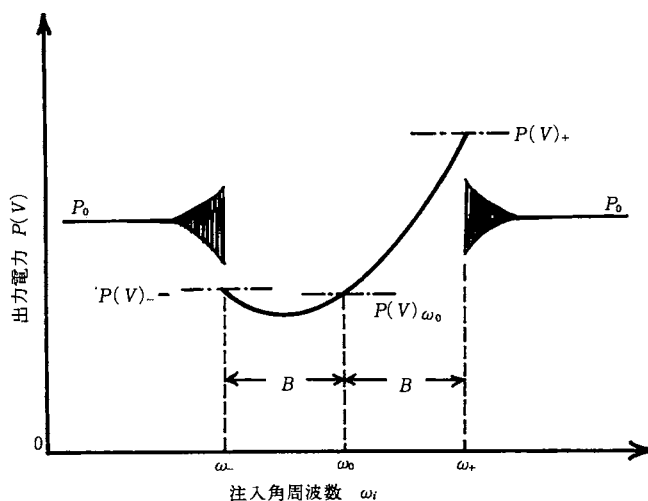
上式によれば動作点において電子アドミタンスが実軸となす角 θ は自励発振出力 P_0 、同期限界における発振出力 $P(V)_{\pm}$ 、および自励発振角周波数での同期出力 $P(V)_{\omega_0}$ を測定することより求められる。

3. 測 定 回 路

動作点において電子アドミタンスが実軸となす角 θ は 2. で論じたように 4 つの電力値のみを測定することによって求められる。本論文ではその測定を周波数掃引注入同期法により X バンドで実施した。第 3 図はその回路構成を示す。のこぎり波で周波数掃引(変調)された注入発振器 Osc. 2 (10V 54 反射形クライストロン)により比較的高い注入利得で被測定発振器 Osc. 1 を注入同期する。被測定発振器の出力の一部を自乗検波し、周波数掃引用ののこぎり波と同期したシンクロスコープの垂直軸に印加し、CRT 面上に表示する。第 4 図にその表示の代表例を示す。同図の横軸は注入信号角周波数 ω_i に相当し、縦軸は電力を示す。注入信号角周波数 ω_i が被測定発振器の自励発振角周波数 ω_0 よりじゅうぶん低いとき、被測定発振器は注入信号によりほとんど影響されず、その出力は自励発振時の出力 P_0 に等しい。 ω_i が ω_0 に近づくと注入の影響が現われ、被測定発振器の出力および角周波数は図示のように複雑に変動する²⁾。つぎに角周波数 ω_- で同期化が起り、発振器の出力角周波数は ω_i に一致する。この同期化は注入角周波数 ω_i が ω_0 を経て ω_+ に至るまで保持される。注入角周波数が ω_+ を越えると再び同期が外れ被測定発振器の出力および角周波数に変動が認められるが、 ω_i が ω_0 から遠ざかるにつれ再び自励発振状態に近づく。



第3図 測定回路構成



第4図 周波数掃引注入同期法における出力電力特性の表示例

上記の方法により自励発振出力 P_0 , 同期限界 (ω_{\pm}) における出力 $P(V)_{\pm}$ および ω_0 における同期出力 $P(V)\omega_0$ を測定すれば式 (9) により θ を求めることができる。この測定法には次のような利点がある。

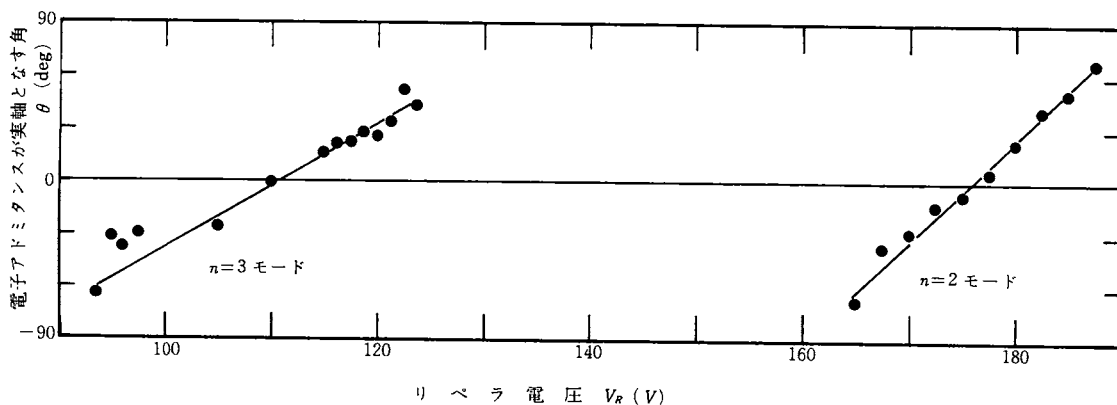
- (i) 測定すべき4つの電力値が同時に CRT 面上に表示されるので測定系の時間的なドリフトの影響を受けない。
- (ii) 式 (9) より明らかなように、電力値の絶対値を測定する必要がなく、 $P(V)_+$ と $P(V)_-$ との差

および P_0 と $P(V)_{\omega_0}$ との差の比を測定すればよい。したがって、シンクロスコープの垂直軸を交流結合とし、高い注入利得で測定ができる。そのため、注入によるじょう乱が小さいと仮定して導出した式 (9) の条件を近似的に満足できる。

4. 測定結果とその検討

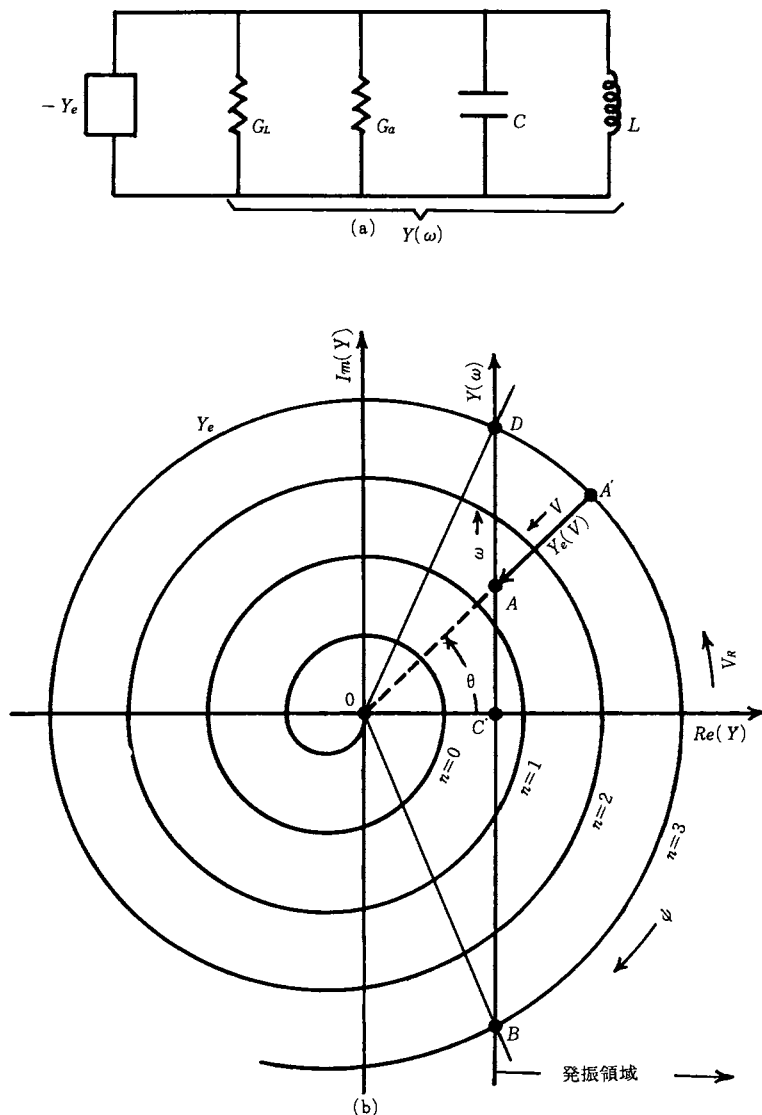
3. の測定法により反射形クライストロン、インパットダイオードおよびガンダイオードについて測定した結果を以下に示す。

第5図は反射形クライストロン (10V54, NEC) についてその電子アドミタンスが実軸となす角 θ をリベラ電圧 V_R に対して測定した結果を示す。同図において、 $n=3$ モードおよび $n=2$ モードともに θ は V_R に対してほぼ直線的に変化している。この結果が反射形クライストロンの電子アドミタンスの理論解析結果と定性的に一致していることを以下に示す。第6図(a)は反射形クライストロンの等価



第5図 反射形クライストロン10V54(NEC)のリベラ電圧 V_R に対する電子アドミタンスが実軸となす角 θ の測定値

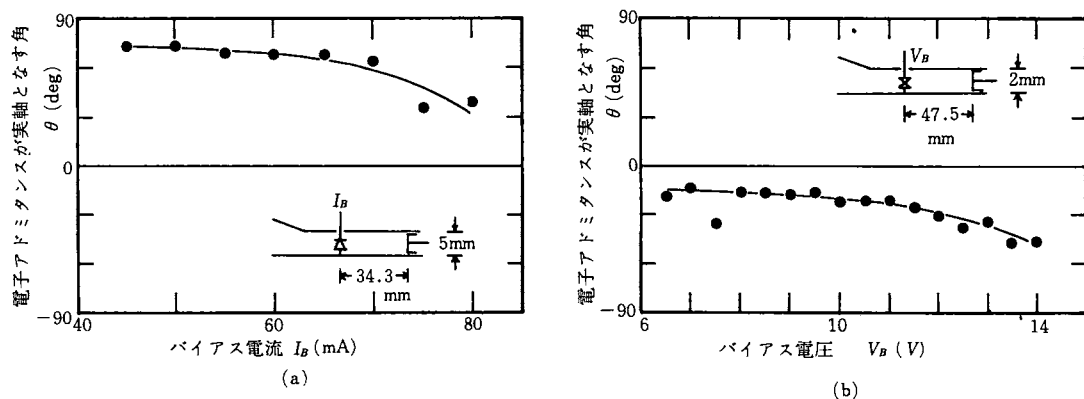
回路で $-Y_e$ はビームの電子アドミタンスを、 $Y(\omega)$ は空洞共振器 (C, L および損失コンダクタンス G_a) および負荷 (G_L) を含む。小信号電子アドミタンス (Y_e) は同図 (b) に示すようにリベラ電圧 V_R に対し螺旋状に変化し、矢印は V_R の増大方向を示す。いま A' 点に相当する V_R で雑音から発振が起動する場合を考えよう。 A' 点では $\text{Re}[Y(\omega) - Y_e(V)] < 0$ であるから振幅は増大し、 Y_e は直線 $A'O$ に沿って収縮する。 A 点に達すると $Y(\omega) - Y_e(V) = 0$ となり振幅の増大は止まり安定な発振が持続する。このとき、電子アドミタンスが実軸となす角 θ は $\angle AOC$ で与えられる。発振が起動する条件は $\text{Re}[Y(\omega) - Y_e(V)] < 0$ であるから、 $n=3$ モードではリベラ電圧 V_R の増大とともに θ は $\angle BOC(> -90^\circ)$ から $\theta=0^\circ$ を通り $\angle DOC(< 90^\circ)$ までほぼ直線的に増大する。しかしながら、 θ の変化する範囲は n の値が小さいモード程狭いはずである。このことは第5図の測定結果とよく一致している。



第6図 反射形クライストロン電子アドミタンス, (a)等価回路, (b)小信号電子アドミタンス Y_e と回路アドミタンス $Y(\omega)$ との関係

第7図(a)は薄形導波管(Xバンド, 高さ5 mm)にマウントしたインパットダイオード(AD-511A, NEC)の測定結果を示す。バイアス電流が45 mA から80 mA まで変化するとき, θ は約75°から40°に単調減少するのみで負値をとらない。また, この結果はこのダイオードの電子アドミタンスの実測値から求めた値とほぼ一致していることが確かめられている。

第7図(b)は薄形導波管(Xバンド, 高さ2 mm)にマウントしたガンダイオード(GD-511B, NEC)の測定結果である。バイアス電圧が6.5 V から14 V まで変化するとき, θ のわずかに単調減少が認められる。また, θ の値はインパットダイオードの場合とは対照的に負値をとる。このことは発振振幅の増大とともに電子サセプタンスが減少することを意味している。



第7図 バイアス変化に対するマイクロ波固体能動素子の電子アドミタンスが実軸となす角 θ の測定値, (a) インパットダイオード AD-511B(NEC) の場合, (b) ガンダイオード GD-511A(NEC) の場合。

5. ま と め

発振器を含むマイクロ波回路の解析や設計にはしばしば能動素子の電子アドミタンスを発振角周波数および発振振幅の関数として知る必要を生じるが、その測定は必ずしも容易ではない。しかしながら、電子アドミタンスの周波数依存性は比較的小さいのでこれを無視し、動作点における電子アドミタンス値と動作点の近傍で発振振幅が増大したときの電子アドミタンスの変化の方向とを知るのみでじゅうぶんな場合が多い。本論文ではその簡易な測定法を提案し、反射形クライストロンおよびマイクロ波固体発振素子について行った実測において信頼できる結果を得た。

参 考 文 献

- 1) K. Kurokawa; Proc. IEEE, Vol. 61, No.10, P. 1386, Oct. 1973.
- 2) H.L. Stover; Proc. IEEE, Vol. 54, No.2, P.310, Feb. 1966.

(昭和52年8月26日受理)